

Д.Г.КОЛИУШКО, канд. техн. наук, ст. науч.сотр., НТУ «ХПИ»;
А.А.ПЕТКОВ, канд. техн. наук, ст. науч.сотр., НТУ «ХПИ»

СТАТИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОРАЖЕНИЯ ОДИНОЧНОГО СТЕРЖНЯ РАЗРЯДОМ МОЛНИИ

У роботі запропонована статистична модель розряду блискавки на вертикальний стрижень. Виконано перевірку адекватності моделі експериментальним даним.

In work the statistical model of the lightning stroke in a vertical rod is offered. Model verification to experimental data is executed.

В работе предложена статистическая модель разряда молнии на вертикальный стержень. Выполнена проверка адекватности модели экспериментальным данным.

Постановка проблемы. Молниезащите объектов различного назначения в настоящее время уделяется все более значительное внимание, что связано, в первую очередь, с опасными, а порой и катастрофическими последствиями поражения молнией различных объектов, обеспечивающих жизнедеятельность крупных промышленных центров. Одним из аспектов, обеспечивающих разработку систем молниезащиты, является совершенствование методов проектирования, которые базируются на соответствующих теоретических и экспериментальных данных по поражению разрядами молнии. Последнее обстоятельство требует разработки моделей развития разряда молнии и формирования зоны поражения этим разрядом различных объектов.

Анализ публикаций. В [1] и [2] приведены экспериментальные данные по поражению объекта-стержня, расположенного в системе электродов стержень-плоскость при использовании импульсов напряжения положительной полярности с длиной фронта 3000 мкс. В частности, при высоте подвески электрода-стержня над плоскостью $H = 10$ м и высоте объекта-стержня $h = 2$ м вероятность попадания разряда в объект-стержень при их соосном расположении составляла 0,62.

В [2] приведены также экспериментальные данные по изменению вероятности поражения объекта-стержня при изменении высоты подвески электрода-стержня в интервале $H = 2,5 - 15$ м при постоянном отношении $H/h = 10$. Данные показывают, что с увеличением H вероятность поражения объекта-стержня уменьшается.

Фотографии разрядов, приведенные в [1, 2] показывают также, что реально однократное поражение объекта-стержня является результатом случайного ступенчатого движения разряда молнии.

Представленная в рассмотренных материалах база экспериментальных данных позволяет производить некоторые количественные и качественные

оценки процесса поражения объекта-стержня разрядом молнии.

В [3] рассмотрена статистическая модель поражения бесконечного прямолинейного проводника разрядом молнии, базирующаяся на задании направления движения разряда углом движения. При этом в силу симметрии рассмотренной задачи, полученные результаты могут быть использованы при анализе распределения вероятности поражения отдельных участков плоскости.

Как показывает проведенный анализ, в настоящее время, как случайное направление движения, так и конечный результат (факт поражения объекта-стержня) не имеют математического описания, которое, при условии адекватности модели реальным данным, позволит существенно снизить объем экспериментальных исследований, а, следовательно, и материальные затраты.

Целью настоящей работы является построение статистической модели разряда молнии на объект-стержень, расположенный на бесконечном прямолинейном проводнике.

Материалы и результаты исследований. Рассмотрим двухступенчатую модель разряда, базирующейся на модели, предложенной в [3] (рис. 1). Разряд из точки 1 движется параллельно оси OX в случайную точку 2, равномерно распределенную в интервале $(-\Delta X, +\Delta X)$. Из точки 2 разряд движется по направлению угла θ , случайно распределенном в интервале $(-\pi/2, \pi/2)$. Траектория разряда представляет собой прямую линию. Если разряд, двигающийся из точки 2 и имеющий дистанцию поражения R, достигает или пересекает объект-стержень или бесконечную прямую линию, то фиксируется поражение объекта-стержня либо прямой линии.

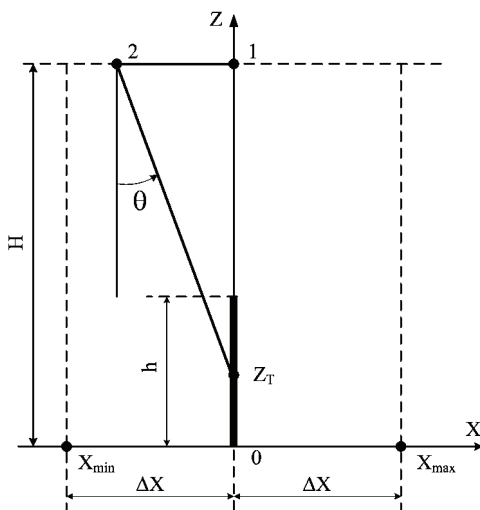


Рисунок 1 – Схема двухступенчатой модели разряда

Предложенная модель отражает три существенных аспекта в поведении разряда молнии: ступенчатость движения разряда, отклонение разряда от оси разрядного промежутка и случайность значений угла движения поражающего разряда θ . Использование модели позволяет дать интегральную оценку процесса поражения объекта-стержня в виде вероятности поражения $P_{\text{ст}}$.

В качестве дистанции поражения R в модели принимается величина

$$R = H + \Delta R, \quad (1)$$

где ΔR – параметр дистанции поражения.

Таким образом, предложенная модель имеет три параметра: ΔX , ΔR и вид закона распределения угла движения θ . Выбором указанных параметров можно найти соответствие экспериментальным данным по величине вероятности поражения объекта-стержня, под которой понимается отношение

$$P_{\text{ст}} = N_{\text{ст}} / N, \quad (2)$$

где $N_{\text{ст}}$ – число поражений стержня; N – суммарное число поражений объекта-стержня и бесконечной прямой линии.

Рассмотрим вариант, когда угол θ имеет равномерное распределение. Исследуем изменение вероятности поражения стержня в зависимости от параметра модели ΔX . Исходя из предварительных расчетов принято $\Delta R = 1 \cdot 10^{-6}$ м.

На рис. 2 приведен график изменения вероятности поражения стержня в зависимости от величины полуинтервала ΔX при высоте начала движения разряда $H = 10$ м и высоте объекта-стержня $h = 2$ м. При данных геометрических размерах вероятность поражения стержня в [1, 2] экспериментально оценена как $P_{\text{ст}} = 62 \%$.

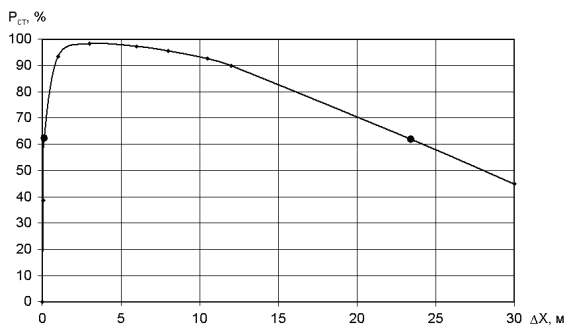


Рисунок 2 – Вероятность поражения объекта-стержня

Из графика, приведенного на рис. 2, видно, что значение $P_{\text{ст}} = 62 \%$ достигается при двух значениях длины полуинтервала $\Delta X = 0,12$ м и $\Delta X = 23,4$ м. Исходя из фотографий разряда, приведенных в [1, 2], в качестве значения параметра модели целесообразно принять $\Delta X = 0,12$ м, как вариант, более достоверно отражающий реальные процессы.

На рис. 3 и рис. 4 показаны плотности распределения вероятностей поражения бесконечной прямой $p(x)$ и объекта-стержня $q(x)$, полученные в результате имитационного моделирования [4]. Общее количество случайных реализаций при моделировании составило: $N = 7 \cdot 10^5$ при $\Delta X = 0,12$ м и $N = 2 \cdot 10^5$ при $\Delta X = 23,4$ м.

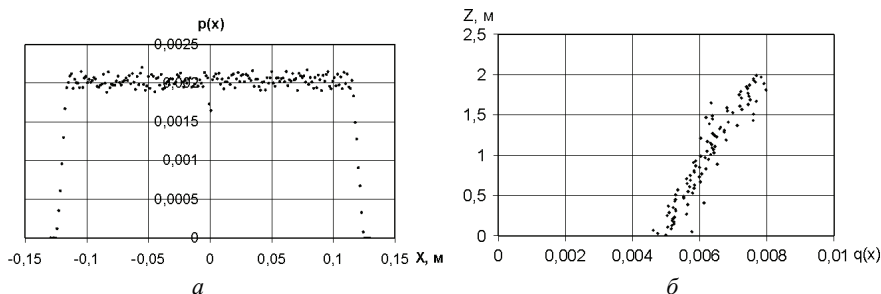


Рисунок 3 – Плотность распределения вероятности поражения при $\Delta X = 0,12$ м:
 a – бесконечной прямой; b – объекта-стержня

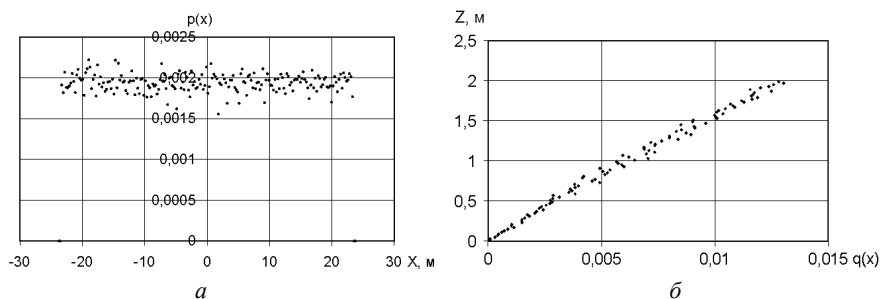


Рисунок 4 – Плотность распределения вероятности поражения при $\Delta X = 23,4$ м:
 a – бесконечной прямой; b – объекта-стержня

С использованием данных, приведенных на рис. 3 и рис. 4 определялась вероятность поражения объекта-стержня.

В качестве второго шага проверки адекватности предложенной модели была рассчитана поражаемость стержня и проведено сравнение с данными, приведенными в [2] при $H/h = 10$. На рис. 5 приведены данные изменения отношения

$$\Psi = P_{\text{ст}}(H)/P_{\text{ст}}(H_0), \quad (3)$$

где $H_0 = 2,5$ м.

Как видно из рис. 5, при изменении $\Delta X = 0,05 - 0,12$ м расчетные данные располагаются достаточно близко к экспериментальным данным, полученными при использовании импульсов напряжения положительной полярности с

длиной фронта 3000 мкс. При $\Delta X = 0,05$ м максимальное относительное отклонение расчетных данных от экспериментальных не превышает 14 %, при $\Delta X = 0,06$ м – 20 %, при $\Delta X = 0,12$ м – 40 %.

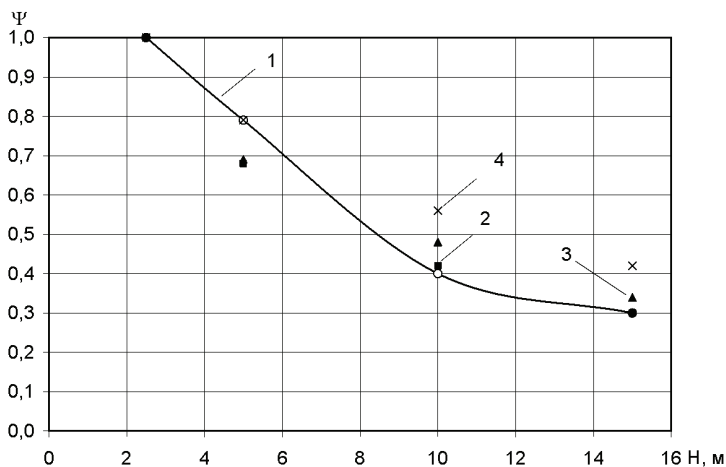


Рисунок 5 – Относительная вероятность поражения стержня $N/h = 10$:

1 – экспериментальные данные, приведенные в [2]; 2 – $\Delta X = 0,05$ м; 3 – $\Delta X = 0,06$ м; 4 – $\Delta X = 0,12$ м

Выводы

1. Предложена двухмерная модель разряда молнии на сложный проводник, состоящий из прямолинейного бесконечного проводника, на котором установлен объект-стержень.

2. Результаты расчетов, полученные с использованием предложенной модели, с достаточной точностью (не более 14%) совпадают с известными экспериментальными данными, полученными при использовании импульсов напряжения положительной полярности с длиной фронта 3000 мкс.

Приведенные материалы могут служить базой для построения более сложных моделей, учитывающих различные физические явления при разряде молнии.

Список источников информации: 1. Об ориентировке канала длиной искры / Г.Н. Александров, В.Л. Иванов, Э.М. Базелян, Е.С. Садыхова // Электричество. – 1973. – № 3. – С. 63-66. 2. К вопросу об оценке защитного действия молниеотводов / Г.Н. Александров, М.М. Зеленецкий, В.Л. Иванов и др. // Известия академии наук СССР. Энергетика и транспорт. – 1970. – № 3. – С. 48-54. 3. Колиушко Д.Г. Статистическая двумерная модель разряда молнии на бесконечный прямолинейный проводник / Д.Г. Колиушко, А.А. Петков // Вісник НТУ «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка і електрофізика високих напруг. – Харків: НТУ «ХПІ», 2011. – № 16. – С. 118-126. 4. Ермаков С.М. Статистическое моделирование / С.М. Ермаков, Г.А. Михайлов. – М.: Наука, 1982. – 296 с.

Поступила в редколлегию 20.08.2011